

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
6. Juni 2002 (06.06.2002)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 02/45135 A2

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: H01L 21/00

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP01/13905

(22) Internationales Anmeldedatum:
28. November 2001 (28.11.2001)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
100 59 665.7 1. Dezember 2000 (01.12.2000) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme
von US): STEAG HAMATECH AG [DE/DE]; Ferdi-
nand-von-Steinbeis-Ring 10, 75447 Sternenfels (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): SZEKERESCH,

Jakob [DE/DE]; Forchenstrasse 15, 75328 Schönberg
(DE). DRESS, Peter [DE/DE]; Holzmann 18, 76646
Bruchsal (DE). DIETZE, Uwe [DE/US]; 105 Rupen,
Austin, TX 78734 (US). SAULE, Werner [DE/DE];
Helga-Barth-Strasse 9, 75015 Bretten (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (national): CA, CN, IL, JP, KR, SG,
US.

(84) Bestimmungsstaaten (regional): europäisches Patent (AT,
BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC,
NL, PT, SE, TR).

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu
veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen
Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on
Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe
der PCT-Gazette verwiesen.

(54) Title: METHOD FOR THERMALLY TREATING SUBSTRATES

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM THERMISCHEN BEHANDELN VON SUBSTRATEN

(57) Abstract: To increase the temperature homogeneity on the surface of a substrate that is to be thermally treated, a method for thermally treating substrates is provided, according to which the substrate is heated by several separately controllable heating elements. A desired-value profile is predefined for each of said heating elements. The method comprises the following steps: locally-analysed measurement of the temperature of the surface of the substrate that faces away from the heating elements, during the thermal treatment; determination of the temperature inhomogeneities occurring on the substrate surface; definition of new desired-value profiles based on said temperature inhomogeneities; and preparation of the new desired-value profiles for subsequent treatments.

(57) Zusammenfassung: Um die Temperaturhomogenität auf der Oberfläche eines thermisch zu behandelnden Substrats zu erhöhen, ist ein Verfahren zum thermischen Behandeln von Substraten vorgesehen, bei dem das Substrat über eine Vielzahl von separat ansteuerbaren Heizelementen beheizt wird, denen jeweils ein Sollwert-Profil vorgegeben wird, mit folgenden Verfahrensschritten: orts aufgelöstes Messen der Temperatur der von den Heizelementen abgewandten Oberfläche des Substrats während der thermischen Behandlung; Ermitteln von auf der Substratoberfläche auftretenden Temperaturinhomogenitäten; Bestimmen neuer Sollwert-Profile auf der Grundlage der ermittelten Temperaturinhomogenitäten; und Bereitstellen der neuen Sollwert-Profile für nachfolgende Behandlungsvorgänge.

WO 02/45135 A2

Verfahren zum thermischen Behandeln von Substraten

- 5 Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum thermischen Behandeln von Substraten, bei dem das Substrat über eine Vielzahl von separat ansteuerbaren Heizelementen beheizt wird.

10 Derartige Vorrichtungen werden beispielsweise im Bereich der Halbleiterindustrie im Anschluß an Belackungsvorgänge von Substraten, insbesondere Fotomasken, verwendet, um die Substrate zur Aushärtung und chemischen Vorbehandlung der Schichten thermisch zu behandeln. Bei der thermischen Behandlung ist es für die nachfolgende Verwendbarkeit der Substrate wichtig, daß die aufgetragenen Schichten möglichst gleichmäßig und homogen be-

15 handelt werden. Dabei tritt jedoch das Problem auf, daß bei gleichmäßiger Ansteuerung der Heizelemente aufgrund von Randeffekten die Substrate nicht gleichmäßig behandelt werden können. Daher ist es bekannt, die Heizelemente im Randbereich der Substrate zu Beginn der thermischen Behandlung weniger stark zu beheizen, da im Mittelbereich zunächst eine vergleichbar

20 größere Masse erwärmt werden muß. Später werden die Heizelemente im Randbereich der Substrate aufgrund der erhöhten thermischen Abstrahlung in diesen Bereichen stärker beheizt.

Aus der auf dieselbe Anmelderin zurückgehenden DE-A-199 07 497 ist eine

25 Vorrichtung und ein Verfahren zum thermischen Behandeln von Substraten angegeben, bei dem eine Vielzahl von separat ansteuerbaren Heizelementen zunächst eine Heizplatte und dann ein darauf aufliegendes Substrat beheizt. Die einzelnen Heizelemente werden jeweils über einen PID-Regler geregelt, wobei der notwendige Sollwert in Form eines Sollwert-Profiles vorgegeben

30 wird. Als Sollwert-Profil ist hier die sich zeitlich, insbesondere in Zeitintervallen, verändernde Vorgabe von Sollwerten zu verstehen.

Während eines Behandlungsvorgangs wird die Temperaturverteilung auf der von der Heizplatte abgewandten Oberfläche des Substrats ermittelt und in Abhängigkeit von der Temperaturverteilung auf der Substratoberfläche gegenüber dem Sollwert-Profil geänderte Sollwerte für die einzelnen Heizelemente bestimmt und an die jeweiligen PID-Regler weitergeleitet. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit, während des Behandlungsvorgangs Korrekturen der Sollwert-Profile vorzunehmen, um eine verbesserte Temperaturhomogenität über die Substratoberfläche hinweg zu erreichen.

- 10 Bei diesem Verfahren ergibt sich jedoch das Problem, daß das Verfahren immer nur auf schon aufgetretene Temperaturinhomogenitäten auf der Substratoberfläche reagieren kann, um diese über eine Veränderung des Sollwert-Profiles der einzelnen Heizelemente nachträglich zu korrigieren. Ein Voraus-
- 15 schauen auf zukünftige, während der Behandlung auftretende Temperaturinhomogenitäten ist nicht möglich. Auch werden die bei einer Behandlung auftretenden Probleme, wie beispielsweise eine erhöhte Temperaturinhomogenität bei einem bestimmten Temperaturwert, bei der Behandlung des nächsten Substrats nicht berücksichtigt, da den einzelnen Heizelementen wiederum das zuvor festgelegte Sollwert-Profil vorgegeben wird. Daher ist zu erwarten, daß
- 20 bei der nächsten Behandlung dieselben Probleme wie bei der vorhergehenden Behandlung auftreten.

Ausgehend von diesem bekannten Stand der Technik liegt der vorliegenden Erfindung daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum thermischen Be-

25 handeln von Substraten zu schaffen, das eine selbstoptimierende Prozeßsteuerung ermöglicht, um die Temperaturhomogenität auf der Oberfläche eines zu behandelnden Substrats zu erhöhen.

Erfindungsgemäß wird die gestellte Aufgabe bei einem Verfahren zum thermischen Behandeln von Substraten, bei dem das Substrat über eine Vielzahl von separat ansteuerbaren Heizelementen beheizt wird, denen jeweils ein Sollwert-Profil vorgegeben wird, durch orts aufgelöstes Messen der Temperatur der von den Heizelementen abgewandten Oberfläche des Substrats wäh-

30

rend der thermischen Behandlung, Ermitteln von auf der Substratoberfläche auftretenden Temperaturinhomogenitäten, Bestimmen neuer Sollwert-Profile auf der Grundlage der ermittelten Temperaturinhomogenitäten und Bereitstellen der neuen Sollwert-Profile für nachfolgende Behandlungsvorgänge
5 gelöst. Dieses Verfahren ermöglicht eine selbstoptimierende Prozeßsteuerung, da die den einzelnen Heizelementen vorgegebenen Sollwert-Profile neu bestimmt und für nachfolgende Behandlungsvorgänge bereitgestellt werden, so daß während der thermischen Behandlung aufgetretene Temperaturinhomogenitäten bei der Bestimmung der neuen Sollwert-Profile berücksichtigt
10 und somit bei der nächsten Behandlung verhindert werden. Hierdurch ergibt sich eine Selbstoptimierung des Sollwert-Profils und somit eine homogenere thermische Behandlung der Substrate.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird
15 eine während der thermischen Behandlung auftretende Temperaturinhomogenität bei der Bestimmung der neuen Sollwert-Profile zeitlich vauseilend berücksichtigt. Bei der Bestimmung der neuen Sollwert-Profile können Sprünge hinsichtlich der Homogenität, die beispielsweise bei einer bestimmten Temperatur bzw. zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Behandlung auftreten, vor
20 Erreichen dieser Temperatur bzw. vor dem jeweiligen Zeitpunkt berücksichtigt werden, so daß diesen Temperaturinhomogenitäten schon bei niedrigeren Temperaturen bzw. zu früheren Zeitpunkten entgegengewirkt werden kann. Somit kann schon vor ihrem Auftreten damit begonnen werden, die ermittelten Temperaturinhomogenitäten auszugleichen. Diese antizipatorische Berücksichtigung von zu bestimmten Zeitpunkten bzw. bei bestimmten Temperaturen
25 auftretenden Inhomogenitäten ermöglichen eine stark verbesserte Temperaturhomogenität während der Behandlung.

Vorzugsweise wird die Temperatur der Substratoberfläche an vorgegebenen
30 Oberflächenpunkten ermittelt, um die benötigte Rechenleistung gegenüber Systemen, bei denen alle Oberflächenpunkte berücksichtigt werden, zu verringern. Um die Genauigkeit des Verfahrens zu erhöhen, wird den Oberflächenpunkten der Mittelwert aller Temperaturmeßwerte auf einem dem Ober-

flächenpunkt zugeordneten Oberflächenbereich zugewiesen. Dabei bleibt die Zuordnung der Oberflächenbereiche zu den Oberflächenpunkten während wenigstens eines Meßzyklus konstant, um über den Meßzyklus hinweg gleichmäßige Ergebnisse zu erhalten.

5

Bei einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung erfolgt die Bestimmung des neuen Sollwert-Profils anhand einer gewichteten Zuordnung der Oberflächenpunkte zu den einzelnen Heizelementen, wodurch der unterschiedliche Einfluß der Heizelemente zu den unterschiedlichen Oberflächenpunkten berücksichtigt wird. Um innerhalb eines Meßzyklus gleichmäßige Ergebnisse zu erhalten, bleibt die gewichtete Zuordnung der einzelnen Heizelemente zu den Oberflächenpunkten während wenigstens eines Meßzyklus konstant. Die gewichtete Zuordnung der einzelnen Heizelemente zu den Oberflächenpunkten kann jedoch bei der Bestimmung des neuen Sollwert-Profils geändert werden, um auch hinsichtlich der Zuordnung eine Optimierung zu erreichen.

10

15

20

Die Sollwert-Profile sehen Sollwert-Änderungen in bestimmten Zeitintervallen vor, um ein bestimmtes Heizprofil zu erzeugen. Um eine verbesserte Anpassung des Sollwert-Profils zu ermöglichen, werden bei der Bestimmung der neuen Sollwert-Profile die Zeitintervalle für die Sollwert-Änderungen vorzugsweise neu gewählt.

25

30

Vorzugsweise erfolgt eine neue Bestimmung des Sollwert-Profils nur dann, wenn Temperaturinhomogenitäten über einem vorgegebenen Schwellenwert auftreten, da bei Temperaturinhomogenitäten unterhalb des Schwellenwerts von einem optimierten System ausgegangen wird, in das möglichst nicht mehr eingegriffen wird. Vorzugsweise liegt das Substrat während der thermischen Behandlung auf einer zwischen den Heizelementen und dem Substrat angeordneten Platte auf.

Die erfindungsgemäße Aufgabe wird auch bei einem Verfahren zum Optimieren von Sollwert-Profilen einer Vielzahl von separat ansteuerbaren Heizele-

menten zum thermischen Behandeln von Substraten gelöst, wobei die Heizelemente anhand jeweils vorgegebener Sollwert-Profile erwärmt werden, die Temperatur der von den Heizelementen abgewandten Oberfläche des Substrats während der Erwärmung ortal aufgelöst gemessen und auf der Substratoberfläche auftretende Temperaturinhomogenitäten zeitabhängig ermittelt werden, wobei neue Sollwert-Profile auf der Grundlage der Temperaturinhomogenitäten während des Behandlungsvorgangs bestimmt und für einen nachfolgenden Erwärmungsvorgang verwendet werden und wobei die vorhergehenden Schritte wiederholt werden, bis die Temperaturinhomogenitäten zu jedem Zeitpunkt der Erwärmung unter einem vorbestimmten Schwellenwert liegen. Hierdurch läßt sich, wie schon oben ausgeführt, ein optimiertes Sollwert-Profil festlegen.

Vorzugsweise wird das erfindungsgemäße Verfahren bei Fotomasken eingesetzt.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels unter Bezugnahme auf die Zeichnungen erläutert; in den Zeichnungen zeigt:

- Fig. 1 eine schematische Seitenansicht eines Systems zur thermischen Behandlung von Substraten gemäß der Erfindung;
- Fig. 2a eine schematische Darstellung eines auf einer Heizplatte angeordneten Substrats;
- Fig. 2b eine Tabelle, die den Einfluß einzelner Heizelemente bezüglich bestimmter Oberflächenpunkte auf dem Substrat zeigt;
- Fig. 3 eine Darstellung der zeitlichen Änderung der örtlichen Sollwert-Verteilung für einzelne Zonen einer zonengesteuerten Heizplatte (5 x 5 Heizzonen) im Verlauf einer thermischen Behandlung eines Substrats;
- Fig. 4a eine Tabelle einer Sollwert-Verteilung für Zonen einer Heizplatte, bei einer thermischen Behandlung mit einer Endtemperatur von 110°C für ein Substrat;

- Fig. 4b eine graphische Darstellung eines solchen Sollwert-Profiles;
Fig. 5 eine schematische Darstellung eines Iterationszyklus für eine automatisierte Optimierung eines vorgegebenen Sollwert-Profiles.

- 5 Fig. 1 zeigt eine schematische Seitenansicht einer Vorrichtung 1 zum thermischen Behandeln von Substraten.

Die Vorrichtung 1 weist eine zonengesteuerte Heizplatte 2 auf, die aus einer quadratischen Grundplatte 3 mit im wesentlichen rechteckigem Querschnitt besteht. Die Grundplatte 3 besitzt eine erste ebene Oberseite 5 und eine segmentierte Unterseite 6. Die Unterseite 6 wird durch jeweils vier sich senkrecht zu den Seitenkanten der Heizplatte erstreckenden Nuten 7 in insgesamt 25 quadratische Segmente 8 aufgeteilt. Die Tiefe der Nuten 7 entspricht ungefähr der halben Dicke der Grundplatte 3. Auf den quadratischen Segmenten 8 der Heizplatte 2 sind jeweils quadratische Heizelemente 10 angeordnet, die in geeigneter Weise, wie z. B. durch Verkleben mit den Segmenten 8 der Grundplatte 3 verbunden sind, und mit ihnen entsprechende Heizzonen bilden. Durch die Anordnung der Heizelemente 10 auf den jeweils durch die Nuten 7 getrennten Segmenten 8 sind sie thermisch voneinander getrennt, so daß sie sich nicht gegenseitig beeinflussen, d. h. daß kein wesentliches thermisches Übersprechen zwischen den Heizelementen auftritt. Über die Grundplatte 3 sind die Heizelemente 10 jedoch ausreichend thermisch miteinander gekoppelt, so daß auf der Oberseite 5 der Grundplatte 3 eine homogene Temperaturverteilung ohne eine thermische Ausprägung der einzelnen Heizelemente im thermischen Bild der Oberseite 5 erreicht wird. Jedem Heizelement 10 ist ein nicht gezeigter Temperatursensor in der Form eines Thermoelements zugeordnet, der die Ist-Temperatur der Heizelemente 10 mißt. Anstelle der Thermoelemente ist auch die Verwendung anderer, z. B. optischer Temperatursensoren möglich.

30

Obwohl die Heizplatte 2 als eine einteilige Grundplatte 3 mit darin ausgebildeten Nuten 7 zur Segmentierung der Unterseite 6 der Grundplatte 3 beschrieben wurde, sei bemerkt, daß die Grundplatte 3 vollständig eben ausge-

bildet sein kann, und die Heizelemente 10 direkt oder über Abstandselemente mit der Grundplatte 3 verbunden sind. In gleicher Weise ist die Erfindung nicht auf die Form und Anzahl der Segmente 8 und der Heizelemente 10 beschränkt.

5

Die ebene Oberseite 5 der Grundplatte 3 der Heizplatte 1 ist benachbart zu einem zu behandelnden Substrat 12, z. B. mit einem Abstand zwischen 0,1 und 0,5 mm angeordnet. Das Substrat wird beispielsweise auf vier nicht dargestellten Halterungen über der Heizplatte 1 gehalten. Oberhalb der Heizplatte 1 und des Substrats 12 ist eine Temperaturmeßvorrichtung 17 in der Form einer Infrarotkamera angeordnet. Die Infrarotkamera 17 ist auf eine von der Heizplatte 1 abgewandte Oberseite 18 des Substrats 12 gerichtet. Die Infrarotkamera 17 beinhaltet eine nicht näher dargestellte Scan-Vorrichtung mit einem bewegbaren Spiegel, über den sequentiell die gesamte Oberfläche 18 des Substrats 12 abgetastet wird. Über die Scan-Vorrichtung wird ein orts aufgelöstes Bild der Temperaturverteilung der Oberseite 18 des Substrats 12 erzeugt, wobei die gesamte Oberfläche beispielsweise einmal pro Sekunde abgetastet wird.

10

15

20

Die Infrarotkamera 17 ist über eine Datenleitung 20 mit einer Rechneinheit in der Form eines PC's 22 verbunden. Innerhalb des PC's werden die von der IR-Kamera erhaltenen Meßwerte verarbeitet und eine räumliche Temperaturverteilung auf der Oberfläche 18 des Substrats ermittelt, und, wie nachfolgend noch näher erläutert wird, verarbeitet.

25

In Fig. 1 ist ferner eine Prozeßsteuerung 24, sowie ein PID-Regler 26 zu sehen, der mit den einzelnen Heizelementen 10 und den nicht dargestellten Temperatursensoren verbunden ist und mit diesen einen Regelkreis bildet. Der PID-Regler regelt die Heizleistung der einzelnen Heizelemente 10 anhand eines durch die Prozeßsteuerung vorgegebenen Sollwert-Profiles, d. h. einer Reihe von sich zeitlich verändernden Temperatur-Sollwerten, insbesondere Zeitintervallen, und der durch die Temperatursensoren gemessenen Temperatur-Ist-Werte.

30

Fig. 2 zeigt eine schematische Draufsicht auf die Heizplatte 1 mit einem darauf aufliegenden Substrat 12, wie beispielsweise einer Fotomaske. Die durch die Heizelemente 10 und die Segmente 8 gebildeten Heizzonen sind schematisch angedeutet und von 1 bis 25 numeriert. Auf dem Substrat 12 sind Oberflächenpunkte 1 bis 13 angezeigt, die, wie nachfolgend noch näher beschrieben wird, als Zuordnungspunkte verwendet werden.

Wie in der schematischen Draufsicht gemäß Fig. 2 zu erkennen ist, deckt das Substrat die mittleren neun der insgesamt 25 Heizzonen der Heizplatte 2 ab. Daher sind bei einer thermischen Behandlung des Substrats hauptsächlich diese neun Zonen beteiligt, obwohl auch die restlichen Zonen einen Einfluß auf die thermische Behandlung besitzen.

Die Tabelle gemäß Fig. 2b zeigt eine Zuordnung der einzelnen Heizzonen zu den Oberflächenpunkten auf dem Substrat. Die in Fig. 2 angegebene Zuordnung und Gewichtung ist nicht exakt und soll lediglich das Prinzip einer Gewichtung darstellen. Beispielsweise beeinflusst die von der Heizzone 1 stammende, das Substrat 12 erreichende Heizleistung ausschließlich die Temperatur des Substrats 12 im Bereich des Oberflächenpunktes 1. Somit ist die Heizzone zu 100 % dem Oberflächenpunkt 1 zugeordnet. Im Gegensatz hierzu beeinflusst die von der Heizzone 2 stammende, das Substrat 12 erreichende Heizleistung sowohl die Temperatur des Substrats im Bereich des Oberflächenpunktes 1 als auch des Oberflächenpunktes 2. Dabei beeinflusst die von der Heizzone 2 ausgehende Wärme den Oberflächenpunkt 1 dreimal stärker als den Oberflächenpunkt 2. Somit ist die Heizzone 2 in einem Verhältnis von 75:25 den Oberflächenpunkten 1 und 2 zugeordnet. Die Tabelle 2b zeigt die Gewichtung für alle 25 Zonen der Heizplatte 1.

Fig. 3 zeigt vier Momentaufnahmen der zeitlichen Änderung einer örtlichen Sollwert-Verteilung für die einzelnen Zonen einer zonengesteuerten Heizplatte mit 5 x 5 Heizzonen im Verlauf einer thermischen Behandlung eines Substrats, die um eine mittlere Graphik gruppiert sind. Die mittlere Graphik zeigt

- die zeitliche Entwicklung des Mittelwerts der gemessenen Temperaturwerte auf der Substratoberfläche, wobei die senkrechten Linien die Zeitpunkte markieren, an denen die Sollwerte für die einzelnen Heizzonen verändert werden. Bei der mittleren Graphik zeigt die vertikale Achse die Temperatur t in $^{\circ}\text{C}$, während die horizontale Achse die Zeit T in Minuten und Sekunden darstellt. Bei den vier Momentaufnahmen der örtlichen Sollwert-Vorgaben sind auf der vertikalen Achse die Soll-Temperatur der jeweiligen Heizzonen in $^{\circ}\text{C}$ angegeben. Die beiden anderen Achsen stellen das 5×5 Grundmuster der Heizzonen dar. Der oben links liegende Graph zeigt die Sollwert-Verteilung der einzelnen Zonen der Heizplatte 1 zu Beginn der thermischen Behandlung, d. h. in einem Zeitintervall von 0 Sekunden bis ungefähr 1 Minute. Der rechts daneben liegende Graph zeigt die Sollwert-Verteilung der zonengesteuerten Heizplatte zum Zeitpunkt von ungefähr 2 Minuten 5 Sekunden, die im dritten Zeitintervall von ungefähr 2 Minuten bis 3 Minuten beibehalten wird. Der unten links liegende Graph zeigt die Sollwert-Verteilung zum Zeitpunkt von ungefähr 5 Minuten für das sechste Zeitintervall und der rechts daneben liegende Graph die Sollwert-Verteilung in einem letzten Zeitintervall, das bei ungefähr 11 Minuten beginnt.
- 20 Wie bei dem Graph oben links zu erkennen ist, wird zu Beginn der thermischen Behandlung die mittlere Zone stärker erwärmt als die anderen Zonen, da in diesem Bereich zunächst eine vergleichsweise größere Masse erwärmt werden muß. Bei dem rechts daneben angeordneten Graph ist zu erkennen, daß die mittlere Zone weniger stark beheizt wird, was auf die größere Wärmeabstrahlung im Randbereich des Substrats zurückzuführen ist. In ähnlicher Weise ist auch bei den unten liegenden Graphen zu erkennen, daß die Randzonen der Heizplatte zumindest teilweise stärker erwärmt werden als die mittlere Zone.
- 30 Die Fig. 4 zeigt ein typisches Profil für eine thermische Behandlung einer Maske, bei dem eine Endtemperatur von 110°C auf der Probenoberfläche erreicht werden soll. Dabei zeigt die Fig. 4a eine Tabelle für eine Sollwert-Verteilung für die Zonen der Heizplatte, wobei in der linken Spalte die Länge

der einzelnen Zeitintervalle für den jeweiligen Temperaturschritt angegeben sind. Fig. 4b zeigt eine dreidimensionale graphische Veranschaulichung des Sollwert-Profils, wobei die vertikale Achse die Temperatur t in °C angibt, die im wesentlichen horizontal verlaufende Achse die Heizzonen 1 bis 25 anzeigt und die nach hinten verlaufende Achse die Zeitintervalle R1 bis R9 markiert. Aus dieser dreidimensionalen Darstellung ist deutlich die unterschiedliche Ansteuerung der jeweiligen Heizzonen 1 bis 25 zu erkennen, wobei zu Beginn der Behandlung die mittlere Heizzone am stärksten beheizt wird.

Fig. 5 zeigt einen Iterationszyklus, der bei einer automatisierten Optimierung eines Sollwert-Profils für die einzelnen Heizzonen der Heizplatte 1 verwendet wird. Im Block 30 beginnt ein Behandlungszyklus, bei dem den 25 Zonen der Heizplatte 1 jeweils ein bestimmtes Sollwert-Profil vorgegeben wird. Die zunächst verwendeten Sollwert-Profile können eine beliebige Form aufweisen, z. B. können sie alle gleich sein, oder sie können normalisierte Startprofile darstellen, wie nachfolgend erläutert wird. Die Sollwert-Profile sind für die thermische Behandlung eines bestimmten Substrats, sowie auf das Erreichen eines vorgegebenen Temperatur-Endwerts ausgelegt.

Während der thermischen Behandlung wird über die Infrarotkamera 17 die Temperatur auf der von den Heizelementen 10 abgewandten Oberfläche 18 des Substrats 12 gemessen und an die Rechneinheit 22 weitergeleitet. In der Rechneinheit 22 wird den zuvor genannten Oberflächenpunkten auf der Oberfläche des Substrats jeweils der Mittelwert aller Meßwerte aus einem dem Oberflächenpunkt zugeordneten Oberflächenbereich zugeordnet. Diese Zuordnung vereinfacht die nachfolgende Berechnung von neuen Sollwert-Profilen.

Im Block 34 wird zu jedem Zeitpunkt der thermischen Behandlung die Temperaturdifferenz zwischen den Oberflächenpunkten auf der Substratoberfläche festgestellt und mit einem vorgegebenen Schwellenwert verglichen. Wenn die Temperaturdifferenz zu jedem Zeitpunkt der thermischen Behandlung unter dem Schwellenwert liegt, geht die Prozeßsteuerung zum Block 36 über, der

anzeigt, daß ein optimiertes Sollwert-Profil vorliegt und keine weitere Anpassung notwendig ist.

Wenn die Temperaturdifferenz jedoch zumindest zeitweise den Schwellenwert übersteigt, geht die Prozeßsteuerung zum Block 38 über, in dem die Sollwert-Profile für die einzelnen Heizelemente neu berechnet werden. Der dabei verwendete Algorithmus umfaßt eine gezielte und gewichtete Zuordnung der Oberflächenpunkte auf dem Substrat zu den Zonen der Heizfläche. Das neu berechnete Sollwert-Profil wird an den Startblock 30 übergeben und anstelle des vorhergehenden Start-Profils gesetzt. Mit diesem neu berechneten Sollwert-Profil wird nunmehr ein erneuter thermischer Behandlungsvorgang durchgeführt, während im Block 32 die Temperaturverteilung auf der Substratoberfläche gemessen wird. Dieser Iterationszyklus wird solange wiederholt, bis die Temperaturdifferenz zwischen den Oberflächenpunkten auf der Substratoberfläche zu jedem Zeitpunkt unter den vorgegebenen Schwellenwert fällt. Zu diesem Zeitpunkt liegt ein optimiertes Sollwert-Profil vor, in das nicht mehr eingegriffen wird. Dieses optimierte Sollwert-Profil wird für nachfolgende thermische Behandlungsvorgänge mit den gleichen Parameter aufweisenden Substraten, die auf den selben Temperatur-Endwert erwärmt werden, verwendet.

Bei der Neuberechnung der Sollwert-Profile können nicht nur die Temperaturvorgaben während vorgegebener Zeitintervalle verändert werden. Vielmehr kann auch die Länge einzelner Zeitintervalle angepaßt werden.

Die Zuordnung der Oberflächenbereiche der Probe zu den Oberflächenpunkten bzw. die Zuordnung der Oberflächenpunkte zu den Zonen der Heizfläche lassen sich ebenfalls verändern.

Gemäß der bevorzugten Ausführungsform der Erfindung werden bei der Neuberechnung der Sollwert-Profile die zu einem bestimmten Zeitpunkt auftretenden Temperaturinhomogenitäten antizipatorisch berücksichtigt, um eine gleichmäßige und frühzeitige Anpassung des Profils zu erreichen. Wenn bei-

spielsweise zu einem Zeitpunkt $T = 50$ Sekunden eine Temperaturinhomogenität an einem bestimmten Oberflächenpunkt auftritt, so wird bei dem neu berechneten Profil diese Inhomogenität schon zu einem früheren Zeitpunkt, z. B. $T = 30$ Sekunden berücksichtigt, indem das Sollwert-Profil wenigstens eines
5 Heizelements so geändert wird, daß schon zu diesem Zeitpunkt eine lokal stärkere oder geringere Erwärmung erfolgt. Somit lassen sich die Temperaturinhomogenitäten ohne Temperatursprünge der Heizelemente und größere Sprünge bei der Sollwert-Vorgabe zwischen den einzelnen Intervallen erreichen.

10

Die oben genannte Optimierung muß für jedes unterschiedliche Substrat sowie für jeden Temperatur-Endwert durchgeführt werden. Zur Zeitersparnis bei der Ermittlung des idealen Sollwert-Profiles für thermische Behandlungen mit verschiedenen Endtemperaturen wird zunächst ein normiertes Profil berechnet.
15 Bei dieser Berechnung wird davon ausgegangen, daß das thermische Verhalten des Substrattyps bei unterschiedlichen Temperaturen im wesentlichen gleich ist. Daher wird das normierte Profil aus einem optimierten Profil dadurch gebildet, daß es durch den Temperatur-Endwert des optimierten Profils geteilt wird, um ein normiertes Profil zu erhalten. Für jede weitere ge-
20 wünschte Endtemperatur wird nun das normierte Profil mit dem neuen Endwert multipliziert. Die so berechneten Sollwert-Profile werden dann als Startprofil bei dem Iterationszyklus gemäß Fig. 5 verwendet. Hierdurch läßt sich die Anzahl der Iterationszyklen vor Erreichen eines optimierten Prozeßprofils erheblich vermindern.

25

Derartig optimierte Profile können einem Kunden zur Verfügung gestellt werden, um dann beispielsweise in Kombination mit dem aus der DE-A-199 07 497 bekannten Verfahren verwendet zu werden, das insofern zum Gegenstand der vorliegenden Anmeldung gemacht wird, um Wiederholungen zu
30 vermeiden. Alternativ kann der Optimierungszyklus auch beim Kunden erfolgen, so daß sich die Prozeßsteuerung über die Zeit hinweg automatisch selbst optimiert.

Die Erfindung wurde zuvor anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels der Erfindung beschrieben, ohne jedoch auf die spezielle Ausführungsform beschränkt zu sein. Beispielsweise könnte die Heizplatte eine andere, wie z. B. eine runde Form, mit runden oder Kreissegmenten gebildeten Heizelementen aufweisen. Statt einer Infrarotkamera könnte auch eine andere, ortsauflösende Temperaturmeßvorrichtung verwendet werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zum thermischen Behandeln von Substraten, bei dem das
5 Substrat über eine Vielzahl von separat ansteuerbaren Heizelementen
beheizt wird, denen jeweils ein Sollwert-Profil vorgegeben wird, mit fol-
genden Verfahrensschritten:
 - a. orts aufgelöstes Messen der Temperatur der von den Heizelementen
abgewandten Oberfläche des Substrats während der thermischen Be-
10 handlung;
 - b. Ermitteln von auf der Substratoberfläche auftretenden Temperaturin-
homogenitäten;
 - c. Bestimmen neuer Sollwert-Profile auf der Grundlage der ermittelten
Temperaturinhomogenitäten; und
 - 15 d. Bereitstellen der neuen Sollwert-Profile für nachfolgende Behand-
lungsvorgänge.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß eine während
der thermischen Behandlung auftretende Temperaturinhomogenität bei
20 der Bestimmung der Sollwert-Profile zeitlich vauseilend berücksichtigt
wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die
Temperatur der Substratoberfläche an vorgegebenen Oberflächenpunk-
25 ten ermittelt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß den Oberflä-
chenpunkten der Mittelwert aller Temperaturmeßwerte aus einem dem
Oberflächenpunkt zugeordneten Oberflächenbereich zugewiesen wird.
- 30 5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Zu-
ordnung der Oberflächenbereiche zu den Oberflächenpunkten während
wenigstens eines Meßzyklus konstant bleibt.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Bestimmung des neuen Sollwert-Profils anhand einer gewichteten Zuordnung der einzelnen Oberflächenpunkte zu den Heizelementen erfolgt.
5
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die gewichtete Zuordnung während wenigstens eines Meßzyklus konstant bleibt.
- 10 8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß die gewichtete Zuordnung bei der Bestimmung des neuen Sollwert-Profils geändert wird.
- 15 9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Bestimmung der neuen Sollwert-Profile die Zeitintervalle für Sollwert-Änderungen neu gewählt werden.
- 20 10. Verfahren nach Anspruch einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine neue Bestimmung des Sollwert-Profils nur dann erfolgt, wenn Temperaturinhomogenitäten über einem vorgegebenen Schwellenwert auftreten.
- 25 11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat während der thermischen Behandlung auf einer zwischen den Heizelementen und dem Substrat angeordneten Platte aufliegt.
- 30 12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als ursprüngliche Sollwert-Profile normierte Sollwert-Profile verwendet werden, die aus einem optimierten Sollwert-Profil berechnet wurden.

13. Verfahren zum Optimieren von Sollwert-Profilen einer Vielzahl von separat ansteuerbaren Heizelementen zum thermischen Behandeln von Substraten mit folgenden Verfahrensschritten

a. Erwärmen der Heizelemente anhand von jeweils vorgegebener Sollwert-Profilen;

b. orts aufgelöstes Messen der Temperatur der von den Heizelementen abgewandten Oberfläche des Substrats während der Erwärmung;

c. zeitabhängiges Ermitteln von auf der Substratoberfläche auftretenden Temperaturinhomogenitäten;

d. Bestimmen neuer Sollwert-Profile auf der Grundlage der Temperaturinhomogenitäten während des Behandlungsvorgangs;

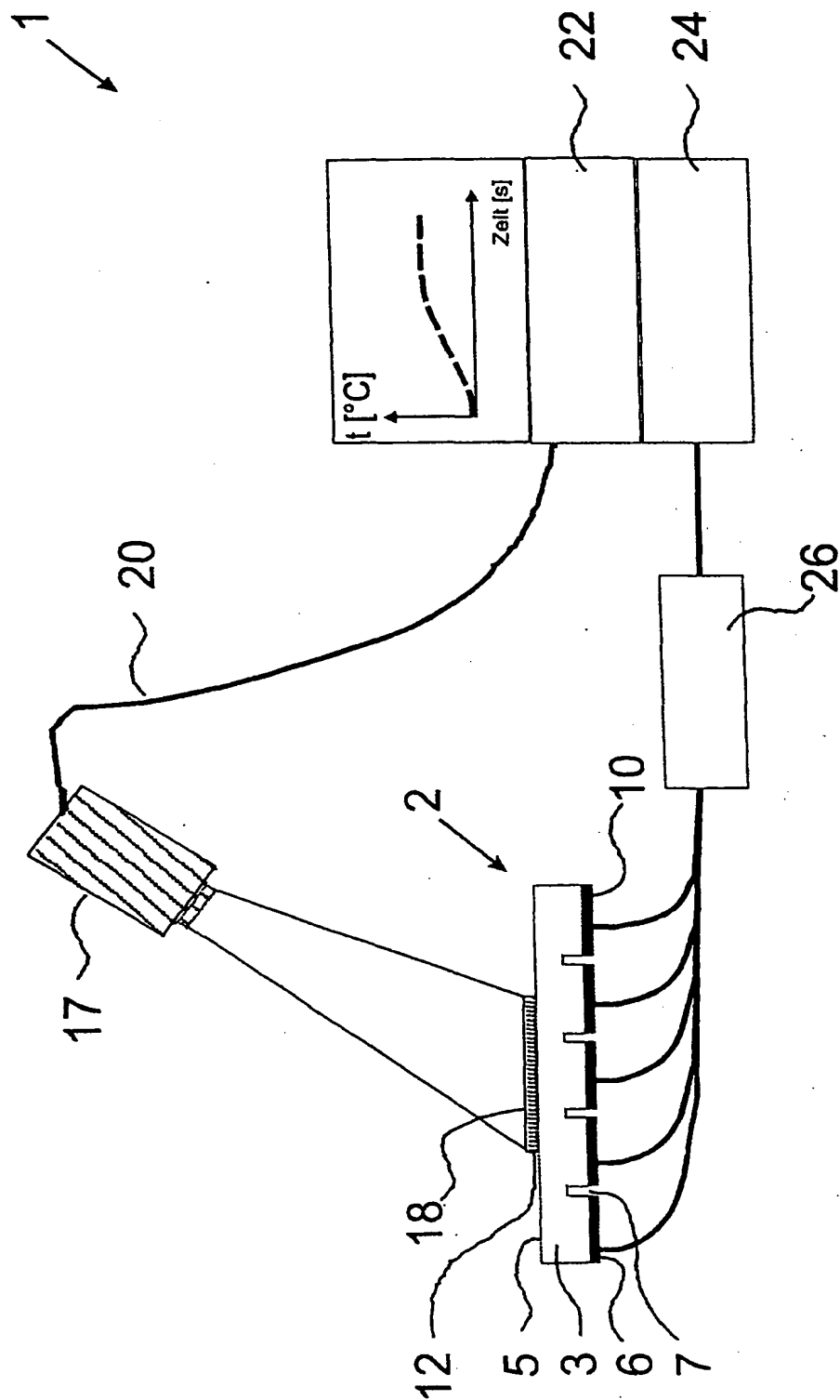
e. Verwenden der neuen Sollwert-Profile für einen nachfolgenden Erwärmungsvorgang;

f. Wiederholen der Schritte a bis e, bis die Temperaturinhomogenitäten zu jedem Zeitpunkt der Erwärmung unter einem vorbestimmten Schwellenwert liegen.

14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Optimierung für unterschiedliche Substrate und unterschiedliche Endtemperaturen der thermischen Behandlung durchgeführt werden.

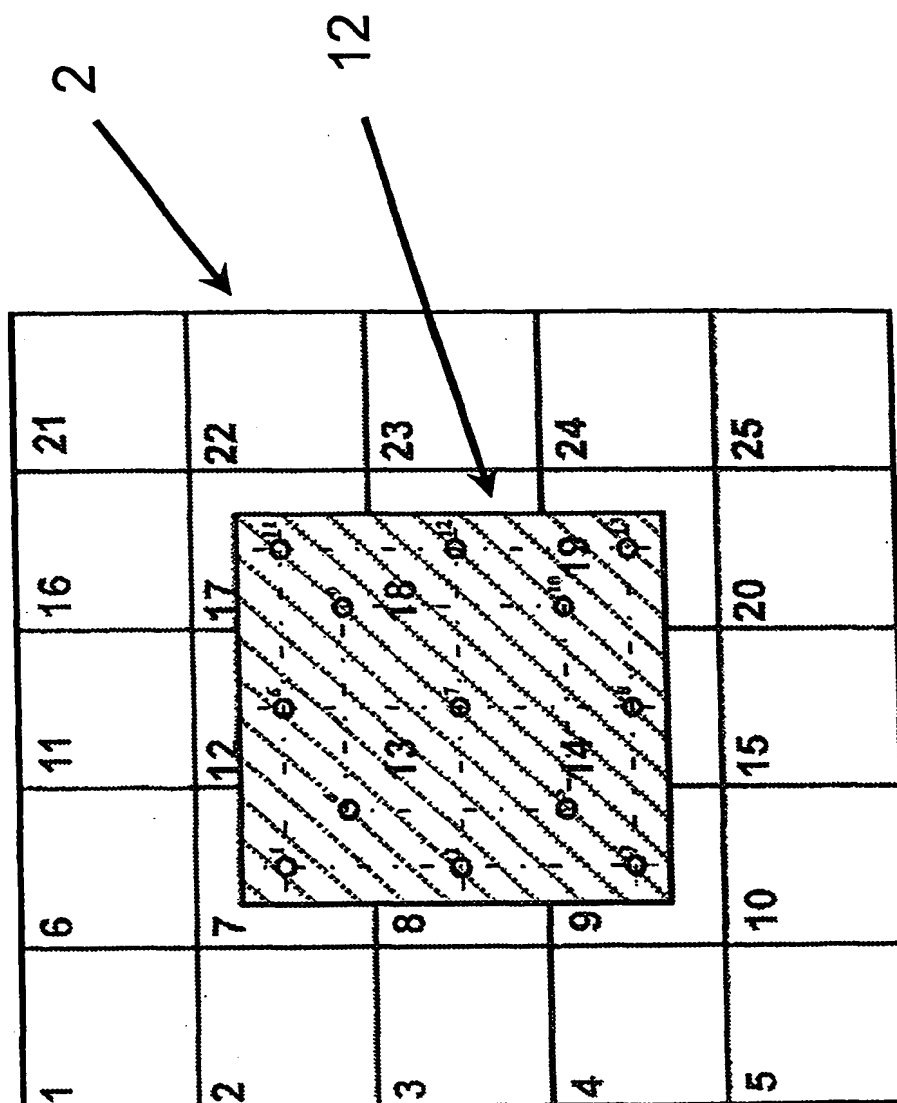
15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die ursprünglich vorgegebenen Sollwert-Profile normierte Sollwert-Profile sind, die auf der Grundlage von zuvor optimierten Sollwert-Profilen berechnet wurden.

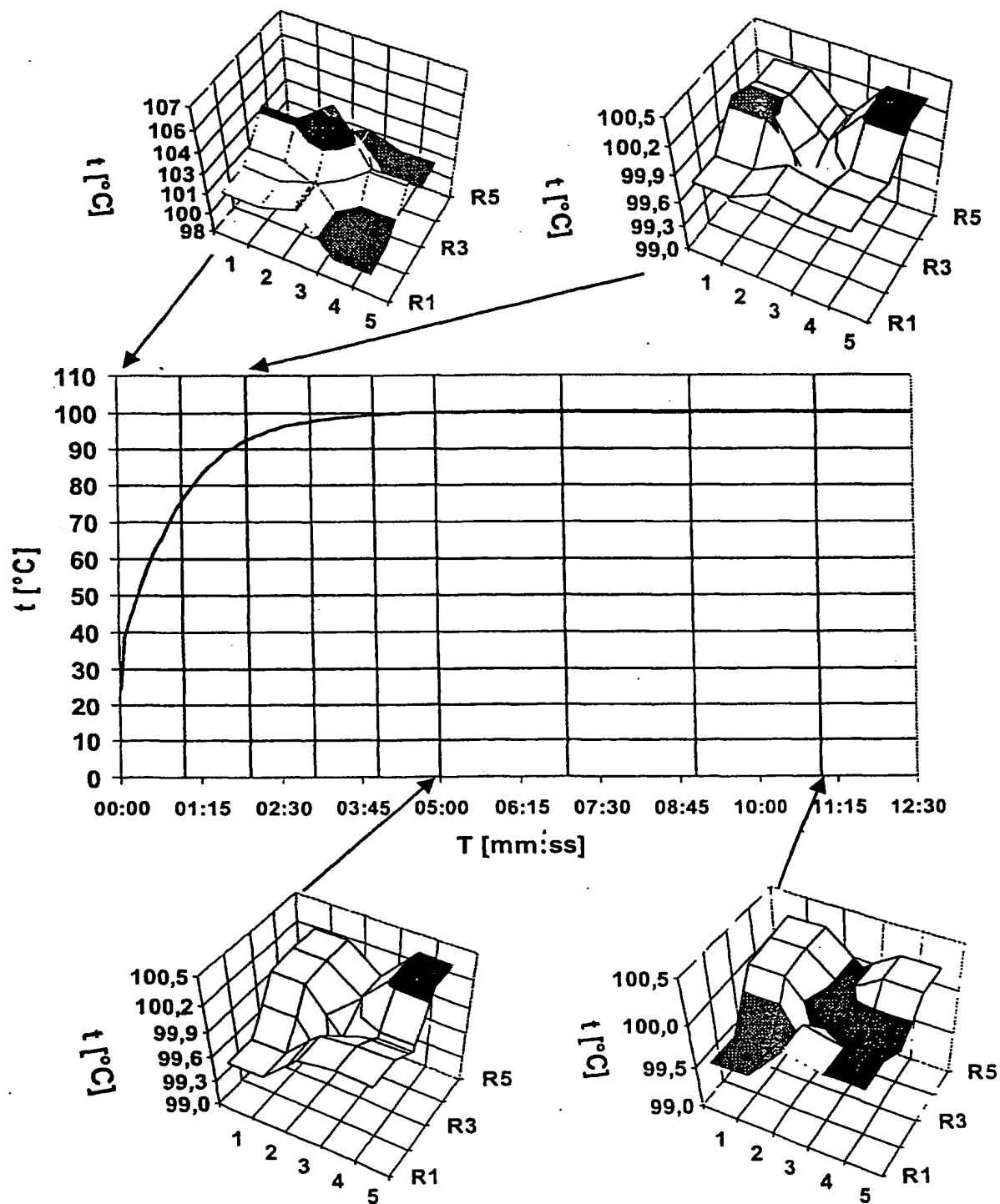
Figur 1



Figur 2

a)



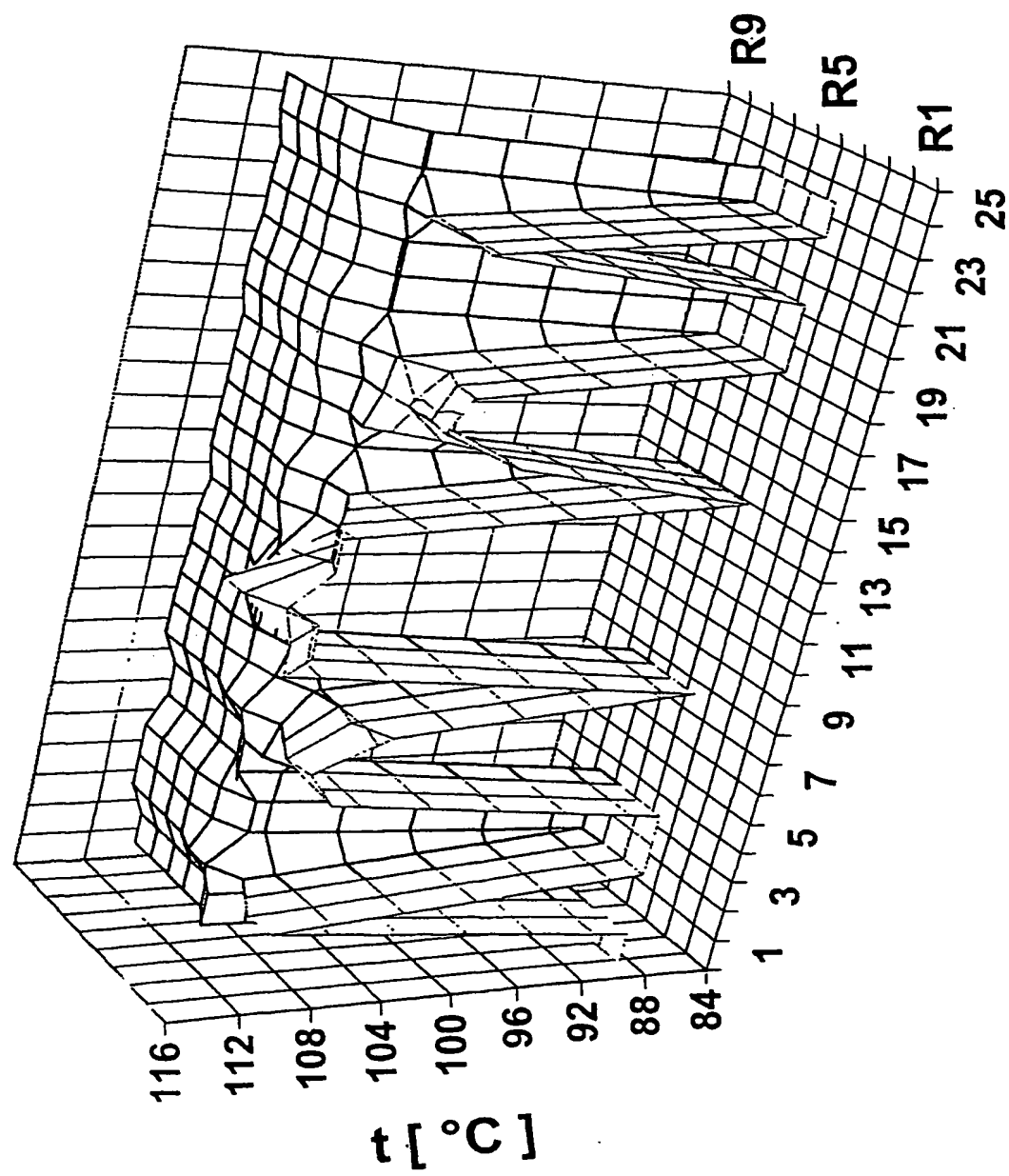
Figur 3

Figur 4

a)

T [s]	zone 1 [°C]	zone 2 [°C]	zone 3 [°C]	zone 4 [°C]	zone 5 [°C]	zone 6 [°C]	zone 7 [°C]	zone 8 [°C]	zone 9 [°C]	zone 10 [°C]	zone 11 [°C]	zone 12 [°C]	zone 13 [°C]
1	90,0	90,0	111,3	90,0	90,0	90,0	109,7	111,3	107,2	90,0	114,1	114,1	114,7
60	90,0	90,0	111,6	90,0	90,0	90,0	109,6	111,6	108,4	90,0	111,5	111,5	117,4
60	90,0	90,0	110,7	90,0	90,0	90,0	109,1	110,7	108,0	90,0	111,8	111,8	117,7
60	90,0	90,0	109,8	90,0	90,0	90,0	110,4	109,8	108,4	90,0	112,3	112,3	112,7
60	110,4	110,4	111,0	108,9	108,9	110,4	110,4	111,0	109,5	108,9	111,7	111,7	111,0
120	109,4	109,4	110,9	110,0	110,0	109,4	109,4	110,9	110,0	110,0	110,9	110,9	109,8
120	109,4	109,4	110,3	110,3	110,3	109,4	109,4	110,3	110,3	110,3	110,1	110,1	110,0
120	109,3	109,3	110,2	110,2	110,2	109,3	109,3	110,2	110,2	110,2	110,1	110,1	109,8
120	109,3	109,3	110,2	110,2	110,2	109,3	109,3	110,2	110,2	110,2	110,0	110,0	109,6
120	109,3	109,3	110,2	110,2	110,2	109,3	109,3	110,2	110,2	110,2	110,0	110,0	109,7

T [s]	zone 14 [°C]	zone 15 [°C]	zone 16 [°C]	zone 17 [°C]	zone 18 [°C]	zone 19 [°C]	zone 20 [°C]	zone 21 [°C]	zone 22 [°C]	zone 23 [°C]	zone 24 [°C]	zone 25 [°C]
1	112,6	112,6	90,0	104,0	108,6	107,5	90,0	90,0	90,0	108,6	90,0	90,0
60	111,7	111,7	90,0	103,9	108,2	107,3	90,0	90,0	90,0	108,2	90,0	90,0
60	110,1	110,1	90,0	106,0	108,3	106,5	90,0	90,0	90,0	108,3	90,0	90,0
60	109,0	109,0	90,0	109,2	108,5	108,2	90,0	90,0	90,0	108,5	90,0	90,0
60	109,3	109,3	107,9	108,8	108,5	109,1	107,9	107,9	107,9	108,5	107,9	107,9
120	110,4	110,4	109,3	109,3	110,0	110,1	110,1	109,3	109,3	110,0	110,1	110,1
120	110,1	110,1	110,0	110,0	109,9	110,3	110,3	110,0	110,0	109,9	110,3	110,3
120	110,0	110,0	110,0	110,0	109,8	110,4	110,4	110,0	110,0	109,8	110,4	110,4
120	110,1	110,1	110,1	110,1	109,9	110,4	110,4	110,1	110,1	109,9	110,4	110,4
120	110,1	110,1	110,0	110,0	109,9	110,3	110,3	110,0	110,0	109,9	110,3	110,3



Figur 4

b)

Figur 5